

РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНДЕНСОР

К. Т. АВЕЛЯН, М. М. АРАКЕЛЯН, С. А. АНЧАРАКЯН, А. Г. ПАТВАКАНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 9 декабря 1997 г.)

Теоретически обоснован и экспериментально осуществлен конденсор для улучшения освещения исследуемых объектов при рентгенодифракционных топографических исследованиях структурных несовершенств (дислокаций) кристаллов. Конденсор представляет собой асимметричный кристалл-монохроматор, изогнутый по параболическому цилиндру, в приповерхностный слой отражающей грани которого введена двумерная сеть дислокаций. Конденсор обеспечивает увеличение светосилы системы (сокращение времени экспозиции) в 4 раза при некотором увеличении разрешающей способности.

Конденсорная система обеспечивает оптимальное освещение исследуемого объекта и является неотделимой частью многих оптических и электронных приборов. В рентгеновских исследованиях конденсоры обеспечивают также формирование пучка рентгеновского излучения с заданными параметрами. Параметры пучка рентгеновского излучения—спектральное и угловое распределение плотности излучения и ширина фронта—имеют существенное значение при формировании рентгенодифракционных изображений. Эти параметры выбираются, исходя из требований задачи.

В прямых методах рентгенодифракционных топографических исследований, каким является визуализация топографических изображений структурных несовершенств кристаллов, широко применяется и считается оптимальным спектральное распределение плотности излучения в пределах естественной ширины спектральной линии характеристического излучения при расходимости пучка $\Delta\theta = \Delta\lambda \operatorname{tg}\theta / \lambda$ определяемой условием Брэгга.

При визуализации рентгенодифракционных топографических изображений поступательно-возвратное движение связано с проблемой запоминания и сложения отдельных частей изображения, поэтому целесообразно применять пучок с широким фронтом. Одним из широко применяемых методов получения широкого фронта является асимметричное отражение. Однако при асимметричном отражении происходит уменьшение углового интервала области отражения, что весьма неблагоприятно для формирования кинематического контраста дислокаций в исследуемом кристалле [1].

Нами осуществлен конденсор, который обеспечивает пучок рентгеновского излучения с параметрами, оптимальными для формирования нормального кинематического контраста изображения дислока-

ций в исследуемом кристалле. При этом одновременно увеличивается светосила (в 4—5 раз) и разрешающая способность системы. В конденсоре нами был применен асимметричный, изогнутый по параболическому цилиндру кристалл-монокроматор, в приповерхностный слой которого введена дислокационная сеть.

Как уже было сказано, отраженный на асимметричном совершенном кристалле пучок излучения имеет малый угловой и спектральный интервалы. При таком пучке кинематический контраст изображений дислокаций в исследуемом кристалле резко снижается. Для оптимального контраста требуется пучок, содержащий несравнимо большие угловой и спектральный интервалы. В случае асимметричного кристалла-монокроматора с дислокационной сетью в приповерхностном слое ситуация меняется. Локальные линейные и угловые смещения решетки вокруг дислокации можно рассматривать как локальную эффективную разориентацию [2, 3]. Точная оценка эффективных разориентаций позволяет определить угловой и спектральный интервалы отраженного пучка излучения. Однако в таких расчетах и оценках необходимости нет. Дело в том, что если падающий на асимметричный кристалл пучок имеет достаточно широкие угловой и спектральный интервалы, то дифрагированный пучок будет содержать угловое и спектральное распределение в соответствии с эффективной разориентацией поля дислокаций.

Выходит, что отраженный на асимметричном кристалле, в приповерхностный слой которого введена дислокационная сеть, пучок излучения содержит такие угловые и спектральные распределения, которые необходимы для формирования оптимального кинематического контраста в другом—исследуемом кристалле. Благодаря существенному увеличению углового и спектрального интервалов существенно увеличивается и поток отраженного излучения (в 10^2 — 10^3 раз). Причем весь этот поток является полезным, поскольку в процессе формирования кинематического контраста дислокаций в исследуемом кристалле участвует весь поток, очищенный от бесполезных долей углового и спектрального интервалов первичного пучка.

Кроме расширения фронта отраженного пучка, асимметричное отражение имеет еще одно замечательное свойство, благодаря которому существенно увеличивается коэффициент полезного действия. При симметричном отражении угловые расходимости падающего и отраженного пучков одинаковы. В случае асимметричного отражения расходимость падающего пучка в пределах центрального максимума будет $\Delta\theta_0 = \Delta\theta_s \sqrt{b}$, где $\Delta\theta_s$ —угловая ширина при симметричном отражении, $b = \sin(\theta + \psi) / \sin(\theta - \psi)$ —линейное увеличение ширины фронта асимметрично отраженного пучка, θ —угол Брэгга, ψ —угол между отражающими плоскостями и входной поверхностью кристалла. Другими словами, асимметричный кристалл стягивает из падающего пучка и переводит в отраженный пучок в \sqrt{b} раз больше интенсивности, чем симметричный кристалл [4].

Необходимо отметить, что эти рассуждения справедливы и строго обоснованы теоретически для совершенного асимметричного кристалла. В случае асимметричного кристалла, в приповерхностный слой которого введена дислокационная сеть, утверждать о точно таком же увеличении коэффициента полезного действия нет оснований. В первом приближении можно считать, что $\Delta\theta_0 = \Delta\theta_s \cdot k \cdot \sqrt{b}$, где k — поправочный коэффициент (он равен единице при совершенном асимметричном кристалле). На первый взгляд, кажется что k должен зависеть от плотности и ориентации дислокаций. Вопрос о значении k будет обсуждаться ниже, исходя из экспериментальных результатов.

Дополнительное двукратное увеличение светосилы системы нами было достигнуто применением асимметричного кристалла-монохроматора, изогнутого по параболическому цилиндру. В самом деле, при точечном источнике рентгеновского излучения, помещенном в фокусе параболического цилиндра, рабочая поверхность (часть, удовлетворяющая условию Брэгга) увеличивается в два раза, поскольку угол расходимости входного пучка $\Delta\varphi = 2\Delta\theta_0$. При этом отраженный пучок будет параллелен. Конечность размеров фокусного пятна рентгеновской трубки влияет на расходимость отраженного пучка и на разрешающую способность системы. Однако оказывается, что на геометрическую разрешающую способность данной системы влияет только размер фокусного пятна, параллельный образующей цилиндра, поскольку в этом направлении размер мнимого изображения пятна не изменяется.

Эксперимент и результаты

Бездислокационный кристалл кремния с размерами $40 \times 20 \times 2 \text{ мм}^3$ был вырезан так, что одна из плоскостей (110) составляла с большой гранью угол $\psi = 6^\circ$. Дислокации в кристалл были введены методом четырехточечного изгиба при температуре $T \sim 1000 \text{ К}$. При четырехточечном изгибе наиболее точно обеспечивается равномерное распределение механического напряжения между двумя средними опорами, и кристалл изгибается по круглому цилиндру. Источниками дислокаций служили уколы алмазного индентора, предварительно нанесенные на большую грань в виде двумерной периодической сетки. Плотность уколов и режим (температура, касательное напряжение и время) были подобраны так, что дислокационные гексагональные полупетли вплотную приближались друг к другу. При введении дислокаций в кристалл каждая из них является результатом микропластической деформации, поэтому кристалл остается изогнутым по круглому цилиндру. Кривизна этого цилиндра зависит от нескольких факторов и контролируется плохо. Необходимая кривизна придается специальным кристаллодержателем после введения дислокаций.

Размеры фокусного пятна рентгеновской трубки, применяемой в наших экспериментах, $0,4 \times 0,4 \text{ мм}^2$. Исходя из требования, что расходимость отраженного пучка не должна превышать $\Delta\theta$ для расстояния

между фокусным пятном и центром рабочей поверхности получим $r = \frac{f_2 \sin 2(\theta - \psi)}{2\sqrt{b} \cdot \Delta \theta_s} \approx 100 \text{ мм}$. Соответственно, для параметра параболы $\rho = r \cdot 2 \sin(\theta - \psi) \approx 1 \text{ мм}$. Для радиуса кривизны рабочей поверхности $R = \frac{\rho}{\sin^2(\theta - \psi)} = 3600 \text{ мм}$. Поскольку радиусы кривизны на краях ра-

бочей поверхности $R_1 = \frac{\rho}{\sin^2(\theta - \psi)}$, $R_2 = \frac{\rho}{\sin^2(\theta + \Delta \theta - \psi)}$ очень близки, то замена параболического цилиндра круглым цилиндром с таким же радиусом кривизны в этом интервале радиусов весьма корректна.

Кристаллодержатель насаждается на ось гониометрической головки, обеспечивающей вращение кристалла вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Головка прикрепляется к столику, позволяющему перемещать головку в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В системе применены три ограничивающие щели: одна—перед кристаллом-монокроматором, две другие—непосредственно перед и после исследуемого кристалла.

Предварительная юстировка кристалла-монокроматора осуществлялась установлением на максимум интегральной интенсивности пучка, отраженного от кристалла-монокроматора, и уточнялась после эталонного исследуемого кристалла.

Светосила системы была оценена измерением интегральной интенсивности пучка, отраженного на эталонном (исследуемом) кристалле при разных кристаллах-монокроматорах и без него (прямой пучок на эталонный кристалл).

В случае асимметричного, бездислокационного и неизогнутого кристалла-монокроматора $I \sim (10^{-2} - 10^{-3}) I_0$, где I_0 —интегральная интенсивность отражения на эталонном (исследуемом кристалле) при прямом пучке (без кристалла-монокроматора), I —интегральная интенсивность отражения в двухкристальной системе. Этот результат не является неожиданным, поскольку в отраженном на асимметричном бездислокационном кристалле пучке существенно уменьшаются спектральный и угловой интервалы, весьма ухудшаются условия формирования кинематического контраста дислокаций.

В случае симметричного неизогнутого кристалла-монокроматора с введенной дислокационной сеткой $I \sim (0,9 - 1,3) I_0$. Этот результат, очевидно, обусловлен существенным увеличением углового и спектрального интервалов пучка, отраженного на дислокациях. Кроме того, благодаря разориентации областей вокруг дислокаций, несколько увеличивается расходимость падающего пучка.

В случае асимметричного неизогнутого кристалла-монокроматора с введенной дислокационной сеткой $I \sim (2 - 2,7) I_0$. Увеличение относительной светосилы в этом случае обусловлено увеличением угла расходимости падающего пучка при асимметричном отражении в $\Delta \theta_0 = k\sqrt{b} \cdot \Delta \theta_s$ раз.

В случае асимметричного изогнутого кристалла-монокроматора с введенной дислокационной сеткой относительная светосила $I \approx 4I_0$. Последнее обусловлено увеличением угла расходимости падающего пучка на параболическом или круглом цилиндре.

Нам не удалось выяснить четкую зависимость относительной интенсивности от отдельных факторов. Кроме того, неясно, является ли увеличение светосилы в 4 раза предельным. Дело в том, что при введении дислокационной сетки некоторые факторы, влияющие на плотность и ориентацию дислокаций, контролируются не полностью. Поэтому изготовить два совершенно идентичных кристалла-монокроматора нам пока не удалось. Влияние плотности и распределения дислокаций в кристалле-монокроматоре на светосилу мы установили приблизительно. Но четко установлено, что увеличение светосилы в 4 раза—реально полученный результат. В наших экспериментах $b \approx 4-5$. Если иметь в виду, что увеличение светосилы в 2 раза однозначно обусловлено изогнутостью кристалла, то, вследствие асимметричности, увеличение будет также в 2 раза и из выражения $\Delta\theta_0 = k \cdot \Delta\theta_s \sqrt{b}$ для k получим $k \sim 1$.

Разрешающая способность двухкристалльной системы оценивалась по топографическим изображениям дислокаций в исследуемом эталонном кристалле, полученным фотографической регистрацией при сравнении с изображением, полученным прямым пучком.

Как уже было сказано, размер мнимого изображения источника в направлении образующей остается неизменным, поэтому ожидается, что геометрическая разрешающая способность в антибрэгговском направлении должна остаться неизменной. Однако при применении конденсора наблюдается некоторое улучшение разрешающей способности системы. Увеличение разрешающей способности в брэгговском и антибрэгговском направлениях объясняется тем, что в двухкристалльной схеме понижается фон рассеянного излучения, поскольку в этом случае на исследуемый кристалл направляется не весь спектр белого излучения, а только спектральный интервал, который необходим для формирования кинематического контраста дислокаций и исследуемом кристалле. Благодаря понижению фона, контраст изображения увеличивается и улучшаются условия разрешения двух близких изображений.

Таким образом, применение в качестве конденсора асимметричного кристалла, изогнутого по параболическому цилиндру, в приповерхностный слой которого введена двумерная дислокационная сеть, дает четырехкратное увеличение светосилы и заметное улучшение разрешающей способности двухкристалльной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Tanner. X-ray Diffraction Topography. Oxford, New York, Pergamon press, 1976.
2. W. Spirkel, В. К. Tanner, С. Whitthouse, et al. Phil. Mag., 69, 221 (1994).

3. W. Spirkl, B. K. Tanner, C. Whitthouse, et al. Phil. Mag., 70, 532 (1994).
4. З. Г. Пинскер. Рентгеновская кристаллооптика. М., Наука, 1982.

X-RAY CONDENSER

K. T. AVETYAN, M. M. ARAKELYAN, S. H. ANCHARAKYAN, A. G. PATVAKANYAN

A condenser for improvement of illumination for investigating objects when studying structural imperfections (dislocations) of crystals is theoretically substantiated and experimentally implemented. The condenser represents an asymmetrical crystal-monochromator bent on the parabolic cylinder, in the near-surface layer of the reflecting facet of which a two-dimensional dislocation network is doped. The condenser provides 4 times magnification of the system aperture (reduction of the exposure time) with a certain increase in the resolution.

ՌԵՆՏԳԵՆՆՅԱՆ ԿՈՆԴԵՆՍՈՐ

Կ. Թ. ԱՎԵՏՅԱՆ, Մ. Մ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Ս. Հ. ԱՆՉԱՐԱԿՅԱՆ, Ա. Գ. ՊԱՏՎԱԿԱՆՅԱՆ

Տեսականորեն հիմնադրված և փորձնականորեն իրականացված է կոնդենսոր, որը հնարավորություն է տալիս մեծացնել նմուշի լուսավորությունը բյուրեղների կառուցվածքային արատների (դիսլոկացիաների) ուսումնասիրության համար անհրաժեշտ պայմանները ստեղծելու համար: Կոնդենսորը ներկայացնում է ապահամաչափ բյուրեղ-մեմբրանի ճկված ըստ սպարաբոլական դրանի, որի անդրադարձնող նիստի մերձակերևույթային շերտ մտցված է դիսլոկացիաները կրկնապես ցանց: Կոնդենսորն ապահովում է համակարգի լուսաուժի մեծացում (լուսակայման ժամանակի կրճատում) 4 անգամ, լուծումակուլյան որոշակի մեծացման դեպքում: